

# 浙江省蜡梅野生种群种实表型性状变异及其与土壤相关因子的关系

社会聪, 蒋雅婷, 张莹, 田敏<sup>①</sup>, 段国敏  
(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

**摘要:** 测定了浙江省(富阳的龙王坎、碧东山和五尖山以及临安的方山)4个蜡梅[*Chimonanthus praecox* (Linn.) Link]野生种群种实11个表型性状及土壤元素含量和pH值;在此基础上,对表型性状进行相关性分析和主成分分析,对供试种群进行聚类分析,并进行了表型性状与土壤相关因子的灰色关联度分析。结果表明:在11个表型性状中,除种子千粒质量外,种群间其他表型性状均有显著或极显著差异,其中,富阳碧东山种群的多项指标值均最大;各表型性状的变异系数差异明显(6.97%~45.72%,均值为19.98%),按变异程度由大到小依次排序为单果种子数、单果质量、单果果壳质量、果实长、果实宽、果形系数、果口直径、种形系数、种子宽、种子长、种子千粒质量;种群间表型分化系数均值为14.83%;11个表型性状中,种形系数和种子千粒质量与其他表型性状的相关性均较小,而果实长、果实宽、果口直径、单果质量、单果果壳质量和单果种子数间均存在极显著相关性。4个种群的土壤元素含量差异明显,土壤均呈弱碱性;各表型性状与同一土壤因子的关联度系数差异较小,但不同土壤因子与同一表型性状的关联度系数差异明显,关联度系数均值从大到小依次为pH值、Na含量、K含量、Cu含量、Mn含量、Ca含量、Mg含量、N含量、Fe含量、P含量、Zn含量。主成分分析结果表明:单果果壳质量、果实宽、单果质量、果实长、种子长、种形系数和种子千粒质量对蜡梅野生种群种实表型性状变异起主要作用。通过聚类分析,可将供试4个蜡梅野生种群分为3组,其中,临安方山和富阳龙王坎2个种群归为一组,另2个种群各自独立成组,聚类分析结果与种群间的地理距离无关。研究结果表明:浙江省蜡梅野生种群种实表型性状变异丰富,以种群内变异占主导地位,遗传特性是其表型性状变异的主要因子,且表型性状变异与多个土壤因子的综合作用相关。

**关键词:** 蜡梅野生种群;种实;表型性状;表型分化;土壤因子;关联度分析

中图分类号: Q949.747.2; Q944; Q945.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2018)02-0077-08  
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.02.10

**Phenotypic trait variation of seed and fruit of wild populations of *Chimonanthus praecox* in Zhejiang Province and its relationship with soil related factors** DU Huicong, JIANG Yating, ZHANG Ying, TIAN Min<sup>①</sup>, DUAN Guomin (Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2018, 27(2): 77-84

**Abstract:** Eleven phenotypic traits of seed and fruit, soil element contents and pH value of four wild populations of *Chimonanthus praecox* (Linn.) Link in Zhejiang Province (Longwangkan, Bidongshan and Wujianshan of Fuyang, and Fangshan of Lin'an) were measured. On this basis, analyses on correlation and principal component of phenotypic traits, cluster analysis on tested populations, and grey correlation degree analysis on phenotypic traits with soil related factors were conducted. The results show that in eleven phenotypic traits, there are significant or extremely significant differences in other phenotypic traits except 1 000-grain weight of seed among populations, in which, multiple index values of population from Bidongshan of Fuyang are the largest, its coefficient of each phenotypic trait variation shows an obvious difference (6.97%-45.72%, with average of 19.98%), according to variation degree, the list from big

收稿日期: 2017-11-03

基金项目: 浙江省科技厅公益技术研究农业项目(2016C32030)

作者简介: 社会聪(1991—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事浙江省野生蜡梅资源评价及繁殖技术研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: tmin115@163.com

to small is seed number per fruit, weight per fruit, pericarp weight per fruit, fruit length, fruit width, coefficient of fruit form, fruit gap diameter, coefficient of seed form, seed width, seed length, 1 000-grain weight of seed; average of phenotypic differentiation coefficient is 14.83% among populations; in eleven phenotypic traits, there is a less correlation of coefficient of seed form and 1 000-grain weight of seed with other phenotypic traits, while there are extremely significant correlations among fruit length, fruit width, fruit gap diameter, weight per fruit, pericarp weight per fruit, and seed number per fruit. Soil element contents of four populations show an obvious difference, the soil is weakly alkaline. The difference of correlation degree coefficient of each phenotypic trait with the same soil factor is small, but that is obvious with different soil factors, and average of correlation degree coefficient from big to small is pH value, Na content, K content, Cu content, Mn content, Ca content, Mg content, N content, Fe content, P content, Zn content. The principal component analysis result shows that pericarp weight per fruit, fruit width, weight per fruit, fruit length, seed length, coefficient of seed form, and 1 000-grain weight of seed play a major role in seed and fruit phenotypic trait variation of wild populations of *C. praecox*. According to cluster analysis, four wild populations of *C. praecox* tested can be classified into three groups, in which, two populations from Fangshan of Lin'an and Longwangkan of Fuyang can be classified in one group, other two groups are independently grouped, the cluster analysis result shows no connection with geographical distance of populations. It is suggested that there are rich phenotypic trait variation in seed and fruit of wild populations of *C. praecox* in Zhejiang Province, variation within population is dominant, and hereditary character is the main factor of phenotypic trait variation, and phenotypic trait variation is associated with the synthesis action of multiple soil factors.

**Key words:** wild population of *Chimonanthus praecox* (Linn.) Link; seed and fruit; phenotypic trait; phenotypic differentiation; soil factor; correlation degree analysis

植物的种实普遍存在形态变异,其表型性状主要受遗传因子控制<sup>[1]</sup>,且在长期的生殖隔离、自然选择和人工选择等<sup>[2-3]</sup>作用下,产生了丰富的变异。种实表型性状变异程度不仅决定植物的扩散能力,对种子萌发、幼苗定居和存活、种群更新和群落演替等<sup>[4-7]</sup>也有重要的生态学意义。学者对思茅松[*Pinus kesiya* var. *langbianensis* (A. Chev.) Gaussen]<sup>[8]</sup>、秦岭冷杉(*Abies chensiensis* Tiegh.)<sup>[2]</sup>、夏蜡梅(*Calycanthus chinensis* Cheng et S. Y. Chang)<sup>[9-10]</sup>和无患子(*Sapindus mukorossi* Gaertn.)<sup>[11]</sup>等植物的种实表型多样性进行了研究,表明利用表型性状研究种群遗传多样性是重要且有效的途径之一<sup>[12]</sup>。

蜡梅[*Chimonanthus praecox* (Linn.) Link]隶属于蜡梅科(Calycanthaceae)蜡梅属(*Chimonanthus* Lindl.),为中国特有的传统名花和经济树种<sup>[13]</sup>。蜡梅冬季开花且芳香宜人,观赏价值极高,现已作为重要的园林绿化树种在全球不同区域广泛栽培,且被用于芳香油的开发生产<sup>[14-15]</sup>。蜡梅广泛分布于安徽、福建、贵州、河南、湖北、湖南、江苏、江西、陕西、山东、四川、云南和浙江等地,是第四纪孑遗植物。野生的蜡梅是培育蜡梅优良品种的重要基因资源,但近年来由于生境破坏及人为影响使其野生资源遭到严重破坏,因此,有必要对蜡梅野生种群的遗传多样性和变

异状况进行深入研究。

浙江省是华东地区蜡梅野生种群最主要的分布区,在蜡梅的区系分布和种质资源等方面占有重要地位<sup>[16-17]</sup>。作者在全面调查浙江省蜡梅野生种群分布状况的基础上,选择4个主要分布区域,对种群间和种群内蜡梅种实表型性状的变异规律进行分析,并探究其与土壤相关因子的关联度,为蜡梅优良种源的筛选和保护提供基础数据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

浙江省蜡梅野生种群主要分布于杭州富阳的龙王坎、碧东山和五尖山以及杭州临安的方山境内。各种群的自然概况见表1。

浙江省蜡梅野生分布区属亚热带季风气候,年均温16.6℃,年均降水量1457.8mm,年均空气相对湿度82%,年雨日152.3d;土壤主要为黑色石灰土。富阳龙王坎种群(P1)的伴生植物主要有柏木(*Cupressus funebris* Endl.)、化香树(*Platycarya strobilacea* Sieb. et Zucc.)和盐肤木(*Rhus chinensis* Mill.)等;种群外貌藤蔓交错,藤蔓植物主要有紫藤[*Wisteria sinensis* (Sims) Sweet]、三叶木通[*Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz.]

表 1 浙江省 4 个蜡梅野生种群的自然概况

Table 1 Natural status of four wild populations of *Chimonanthus praecox* (Linn.) Link in Zhejiang Province

种群编号 No. of population	地点 Plot	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向 Slope aspect
P1	富阳龙王坎 Longwangkan of Fuyang	N30°06'	E119°37'	124	20-40	东南 Southeast
P2	富阳碧东山 Bidongshan of Fuyang	N30°03'	E119°34'	155	70-80	西北 Northwest
P3	富阳五尖山 Wujianshan of Fuyang	N30°09'	E119°35'	351	30-40	西北 Northwest
P4	临安方山 Fangshan of Lin'an	N30°08'	E119°37'	380	40-50	西南 Southwest

和常春油麻藤 (*Mucuna sempervirens* Hemsl.) 等。富阳碧东山种群 (P2) 和临安方山种群 (P4) 的伴生植物主要有化香树、枇杷 [ *Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl. ]、浙江楠 (*Phoebe chekiangensis* C. B. Shang)、桂花 [ *Osmanthus fragrans* (Thunb.) Lour. ]、紫楠 [ *Phoebe sheareri* (Hemsl.) Gamble ]、糙叶树 [ *Aphananthe aspera* (Thunb.) Planch. ]、青冈 [ *Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst. ]、枳椇 (*Hovenia acerba* Lindl.)、络石 [ *Trachelospermum jasminoides* (Lindl.) Lem. ] 和野菊 (*Chrysanthemum indicum* Linn.) 等。富阳五尖山种群 (P3) 的蜡梅个体数量较多且分布相对集中, 该种群以蜡梅为优势种, 其他灌木和草本种类均较少, 群落盖度极低。

## 1.2 方法

1.2.1 种实采集和性状测定 在 2017 年 7 月中旬蜡梅果实成熟期, 在各种群内随机选取株龄 10~20 a、生长正常、无严重缺陷和病虫害的成年个体 10~20 株作为样株, 株间距保持 20 m 以上, 以最大限度排除亲缘性。选择各样株向阳侧枝条, 在枝条中部随机采集果实 10~20 个, 按样株分装后带回实验室测量种子和果实的相关指标。

所测的种子和果实表型性状指标共 11 个, 其中, 种子表型性状指标包括种子长、种子宽、种形系数 (种子长宽比) 和种子千粒质量; 果实表型性状指标包括果实长、果实宽、果形系数 (果实长宽比)、果口直径 (果实顶端开口处的内径)、单果质量、单果果壳质量和单果种子数。分别用电子游标卡尺 (精度 0.01 cm) 和电子天平 (精度 0.01 g) 测定, 各指标重复测定 3 次, 结果取平均值。

1.2.2 土壤样品采集及其相关因子测定 在各种群内按照“S”型曲线选取 5 株样株, 在每一样株根系附近挖取距地表 0~20 cm 的土层样品, 混合后自然风干、过筛 (100 目), 备用。分别按照 LY/T 1239—1999、LY/T 1228—2015、LY/T 1232—2015、LY/T 1234—2015、LY/T 1270—1999、LY/T 1271—1999、

LY/T 1262—1999、LY/T 1261—1999、LY/T 1260—1999、LY/T 1263—1999 和 LY/T 1246—1999 中的方法测定土壤的 pH 值及 N、P、K、Ca、Mg、Fe、Zn、Cu、Mn 和 Na 含量, 测定工作由国家林业局经济林产品质量检验检测中心 (杭州) 完成。

## 1.3 数据处理和分析

采用 EXCEL 2007、SPSS 20.0 和 SAS 11.5 软件进行数据统计和差异显著性分析; 采用 UPGMA 法进行 Q 型聚类分析; 用表型分化系数衡量种群间表型分化程度; 用变异系数衡量种群内各表型性状的变异水平; 用主成分分析法获得各表型性状对蜡梅种群种实变异的贡献率。

采用线性模型“ $Y_{ijk} = \mu + P_i + T_{i(j)} + e_{(ij)k}$ ”对蜡梅表型性状变异进行巢式方差分析<sup>[8]</sup>。式中,  $Y_{ijk}$  为第  $i$  个种群第  $j$  个个体第  $k$  个观测值,  $\mu$  为总均值,  $P_i$  为第  $i$  个种群的效应值 (固定),  $T_{i(j)}$  为第  $i$  个种群第  $j$  个个体的效应值 (随机),  $e_{(ij)k}$  为实验误差。

表型分化系数 ( $V_{st}$ ) 根据公式“ $V_{st} = [\sigma_{t/s}^2 / (\sigma_{t/s}^2 + \sigma_s^2)] \times 100\%$ ”进行计算<sup>[18]</sup>。式中,  $\sigma_{t/s}^2$  为种群间方差分量,  $\sigma_s^2$  为种群内方差分量。

变异系数 ( $CV$ ) 根据公式“ $CV = (SD/\bar{X}) \times 100\%$ ”进行计算。式中,  $SD$  为标准差,  $\bar{X}$  为平均值。

以蜡梅种实表型性状数据组成母数列、土壤元素含量各自的数列为子数列, 构建数据矩阵并均值化后进行无量纲化处理, 参照文献 [19-20] 对蜡梅种实表型性状变异与土壤相关因子进行灰色关联度分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 种实表型性状的比较及其变异分析

分布于浙江省的 4 个蜡梅野生种群种实 11 个表型性状的均值及各表型性状的变异系数和表型分化系数均见表 2。

2.1.1 种实表型性状的比较 由表 2 可见: 富阳龙

王坎种群的种形系数和单果果壳质量均最大;富阳碧东山种群的种子长、种子宽、种子千粒质量、果实长、果实宽、果形系数、果口直径、单果质量和单果种子数均最大,其中,果口直径、单果质量和单果种子数均极显著高于其他种群;富阳五尖山种群的果形系数和种

子千粒质量均最小;临安方山种群的种子长、种形系数、果实长、果实宽、单果质量、单果种子数和单果果壳质量均最小,其中,种子长、种形系数、果实宽和单果质量均极显著低于其他种群。11个表型性状中,仅种子千粒质量在种群间无显著差异。

表2 浙江省蜡梅野生种群种实表型性状的均值及各表型性状的变异系数和表型分化系数( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Average, coefficients of variation and phenotypic differentiation of phenotypic traits of seed and fruit of wild populations of *Chimonanthus praecox* (Linn.) Link in Zhejiang Province ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

种群 <sup>2)</sup> Population <sup>2)</sup>	种子长/mm Seed length	种子宽/mm Seed width	种形系数 Coefficient of seed form	种子千粒质量/g 1 000-grain weight of seed
P1	15.67±1.10Aa(7.05%)	6.75±0.64Bb(9.55%)	2.34±0.21Aa(9.03%)	321.48±6.51Aa(2.02%)
P2	15.87±0.87Aa(5.45%)	7.20±0.51Aa(7.15%)	2.21±0.17Bc(7.54%)	341.00±29.69Aa(8.71%)
P3	15.59±1.16Aa(7.40%)	6.90±0.48Bb(6.90%)	2.27±0.20Bb(8.54%)	309.54±19.66Aa(6.35%)
P4	14.77±1.34Bb(9.10%)	6.93±0.53ABb(7.68%)	2.14±0.17Cd(8.03%)	328.95±35.47Aa(10.79%)
M <sub>1</sub>	15.48±0.42(7.25%)	6.94±0.16(7.82%)	2.24±0.07(8.29%)	325.24±11.43(6.97%)
$\sigma_{i/s}^2$	0.258	0.033	0.007	21.042
$\sigma_s^2$	0.828	1.053	1.288	172.443
$V_{st}/\%$	23.73	3.02	0.56	10.88
种群 <sup>2)</sup> Population <sup>2)</sup>	果实长/mm Fruit length	果实宽/mm Fruit width	果形系数 Coefficient of fruit form	果口直径/mm Fruit gap diameter
P1	52.02±7.60Aa(14.62%)	16.18±2.57Aa(15.91%)	3.24±0.32ABab(9.85%)	6.86±0.93Bc(13.62%)
P2	53.88±10.51Aa(19.50%)	16.42±3.10Aa(18.90%)	3.34±0.67Aa(19.97%)	7.61±1.09Aa(14.34%)
P3	47.90±8.73Bb(21.62%)	15.84±2.88Aa(18.65%)	3.04±0.37Cc(17.05%)	6.97±0.75Bbc(11.42%)
P4	45.50±9.08Bb(19.95%)	14.61±3.13Bb(21.44%)	3.16±0.46BCbc(14.59%)	7.10±1.00Bc(14.03%)
M <sub>1</sub>	49.82±3.30(18.92%)	15.76±0.70(18.72%)	3.20±0.11(15.36%)	7.14±0.29(13.35%)
$\sigma_{i/s}^2$	15.152	0.646	0.015	0.093
$\sigma_s^2$	3.827	1.981	2.041	2.811
$V_{st}/\%$	79.83	24.58	0.74	3.20
种群 <sup>2)</sup> Population <sup>2)</sup>	单果质量/g Weight per fruit	单果果壳质量/g Pericarp weight per fruit	单果种子数 Seed number per fruit	M <sub>2</sub> / % <sup>3)</sup>
P1	1.47±0.54Bb(36.76%)	0.64±0.23Aa(35.14%)	2.8±1.2Bb(43.89%)	17.95
P2	1.80±0.79Aa(43.53%)	0.57±0.22ABb(38.35%)	3.5±1.5Aa(42.56%)	20.55
P3	1.48±0.60Bb(42.57%)	0.59±0.21Aab(35.10%)	2.6±1.2Bb(49.37%)	20.45
P4	1.16±0.48Cc(41.32%)	0.50±0.18Bc(36.87%)	2.1±0.9Bb(47.06%)	20.99
M <sub>1</sub>	1.48±0.23(41.05%)	0.58±0.05(36.37%)	2.7±0.5(45.72%)	19.98
$\sigma_{i/s}^2$	0.074	0.003	0.393	
$\sigma_s^2$	2.293	3.038	2.537	
$V_{st}/\%$	3.13	0.11	13.41	14.83

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写和大写字母分别表示不同种群间同一表型性状在0.05和0.01水平上差异显著 Different lowercases and capitals in the same column indicate the significant differences in the same phenotypic trait among different populations at 0.05 and 0.01 levels, respectively. 括号内的百分数为变异系数 The percentages in brackets are coefficients of variation.

<sup>2)</sup> P1: 富阳龙王坎 Longwangkan of Fuyang; P2: 富阳碧东山 Bidongshan of Fuyang; P3: 富阳五尖山 Wujianshan of Fuyang; P4: 临安方山 Fangshan of Lin'an. M<sub>1</sub>: 各表型性状的均值 Average of each phenotypic trait.  $\sigma_{i/s}^2$ : 种群间方差分量 Variance component among populations;  $\sigma_s^2$ : 种群内方差分量 Variance component within population;  $V_{st}$ : 表型分化系数 Phenotypic differentiation coefficient.

<sup>3)</sup> M<sub>2</sub>: 各种群所有表型性状变异系数的均值 Average of coefficients of all phenotypic trait variations of each population.

2.1.2 种实表型性状的变异分析 由表2还可见:各表型性状的变异程度有明显差异。各表型性状的变异程度由大到小依次为单果种子数、单果质量、单果果壳质量、果实长、果实宽、果形系数、果口直径、种

形系数、种子宽、种子长、种子千粒质量。单果种子数、单果质量和单果果壳质量的变异系数明显大于其他表型性状,说明这3个表型性状易受环境影响。其中,单果种子数的变异系数最大,为45.72%,稳定性



最差;种子长、种子宽、种形系数和种子千粒质量的变异系数相对较小,说明这4个表型性状较为稳定,其中种子千粒质量变异系数最小(6.97%),稳定性最好。

从11个表型性状的变异系数均值看,富阳碧东山、富阳五尖山和临安方山3个种群的均值相近(约20%),而富阳龙王坎种群的均值仅为17.95%,明显小于前3个种群,表明不同种群间11个表型性状的变异系数均值也存在一定差异。

从巢式方差分析结果看,11个表型性状的表型分化系数为0.11%~79.83%,差异明显。而种群间的表型分化系数均值仅为14.83%,说明种群内的表型分化系数均值达到了85.17%,表明蜡梅野生种群种实表型性状变异以种群内变异为主。

## 2.2 种实表型性状的相关性和主成分分析

2.2.1 相关性分析 对供试4个蜡梅野生种群种实11个表型性状间的相关性进行分析,结果见表3。结果显示:蜡梅种子和果实性状间存在不同程度的相关性。除种形系数外,果实长与其他表型性状均呈显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )正相关;种形系数仅与种子宽呈极显著负相关,相关系数为-0.546,与其他表型性状均无显著相关性;种子千粒质量仅与果实长呈显著正相关,相关系数为0.507,与其他表型性状均无显著相关性。总体上看,11个表型性状中,种形系数和种子千粒质量与其他表型性状的相关性均较小;果实长、果实宽、单果质量、单果种子数、果口直径和单果果壳质量6个果实表型性状间均存在极显著相关性。

表3 浙江省蜡梅野生种群种实表型性状的相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficient among phenotypic traits of seed and fruit of wild populations of *Chimonanthus praecox* (Linn.) Link in Zhejiang Province<sup>1)</sup>

表型性状 Phenotypic trait	不同表型性状间的相关系数 Correlation coefficient among different phenotypic traits										
	SL	SW	CSF	GWS	FL	FW	CFF	FGD	WF	PWF	SNF
SL	1.000										
SW	0.367**	1.000									
CSF	-0.013	-0.546**	1.000								
GWS	0.247	0.423	-0.174	1.000							
FL	0.287**	0.170**	-0.012	0.507*	1.000						
FW	0.308**	0.137*	-0.011	0.215	0.722**	1.000					
CFF	-0.050	0.040	-0.006	0.239	0.363**	-0.365**	1.000				
FGD	0.116*	0.178**	-0.060	0.247	0.463**	0.604**	-0.196**	1.000			
WF	0.379**	0.229**	-0.074	0.356	0.759**	0.840**	-0.118	0.564**	1.000		
PWF	0.314**	0.137*	-0.055	0.357	0.698**	0.818**	-0.167**	0.533**	0.882**	1.000	
SNF	0.230**	0.173**	-0.070	0.136	0.686**	0.736**	-0.062	0.482**	0.895**	0.705**	1.000

<sup>1)</sup> SL: 种子长 Seed length; SW: 种子宽 Seed width; CSF: 种形系数 Coefficient of seed form; GWS: 种子千粒质量 1 000-grain weight of seed; FL: 果实长 Fruit length; FW: 果实宽 Fruit width; CFF: 果形系数 Coefficient of fruit form; FGD: 果口直径 Fruit gap diameter; WF: 单果质量 Weight per fruit; PWF: 单果果壳质量 Pericarp weight per fruit; SNF: 单果种子数 Seed number per fruit. \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ .

2.2.2 主成分分析 对供试4个蜡梅野生种群种实11个表型性状进行主成分分析,结果见表4。结果显示:第1、第2、第3和第4主成分的贡献率分别为40.011%、19.992%、16.486%和10.167%,累计贡献率达到86.656%,表明这4个主成分可以代表11个表型性状的绝大部分信息。

在第1主成分中,主要作用因子是单果果壳质量、果实宽、单果质量和果实长,特征向量分别为0.957、0.863、0.828和0.824;在第2主成分中,主要作用因子是种子长,特征向量为0.838;在第3主成分中,主要作用因子是种形系数,特征向量为0.807;

在第4主成分中,主要作用因子是种子千粒质量,特征向量为0.738。由此可见,单果果壳质量、果实宽、单果质量、果实长、种子长、种形系数和种子千粒质量对蜡梅野生种群种实表型性状变异有主要作用。

## 2.3 种实表型性状与土壤相关因子的灰色关联度分析

2.3.1 土壤相关因子的比较 供试4个蜡梅野生种群土壤相关因子的测定结果见表5。结果显示:土壤大量元素中,富阳碧东山种群土壤中N和P含量明显高于其他种群,而富阳五尖山种群土壤中N和K含量明显小于其他种群。土壤微量元素中,Zn和Fe

表 4 浙江省蜡梅野生种群种实表型性状的主成分分析结果<sup>1)</sup>Table 4 Result of principal component analysis on phenotypic traits of seed and fruit of wild populations of *Chimonanthus praecox* (Linn.) Link in Zhejiang Province<sup>1)</sup>

主成分 Principal component	特征向量 Eigenvector											E	CR/%	CCR/%
	SL	SW	CSF	GWS	FL	FW	CFF	FGD	WF	PWF	SNF			
1	-0.261	0.137	-0.375	0.408	0.824	0.863	-0.195	0.789	0.828	0.957	0.568	4.401	40.011	40.011
2	0.838	0.611	0.253	0.243	0.362	-0.272	0.797	-0.153	0.186	0.009	0.319	2.199	19.992	60.003
3	0.251	-0.626	0.807	-0.082	-0.005	0.193	-0.313	-0.434	0.267	0.077	0.548	1.813	16.486	76.489
4	-0.071	-0.385	0.305	0.738	0.179	0.036	0.222	0.175	-0.307	0.025	-0.346	1.118	10.167	86.656

<sup>1)</sup> SL: 种子长 Seed length; SW: 种子宽 Seed width; CSF: 种形系数 Coefficient of seed form; GWS: 种子千粒质量 1 000-grain weight of seed; FL: 果实长 Fruit length; FW: 果实宽 Fruit width; CFF: 果形系数 Coefficient of fruit form; FGD: 果口直径 Fruit gap diameter; WF: 单果质量 Weight per fruit; PWF: 单果果壳质量 Pericarp weight per fruit; SNF: 单果种子数 Seed number per fruit; E: 特征值 Eigenvalue; CR: 贡献率 Contribution rate; CCR: 累计贡献率 Cumulative contribution rate.

表 5 浙江省蜡梅野生种群土壤相关因子的比较

Table 5 Comparison on soil related factors of wild populations of *Chimonanthus praecox* (Linn.) Link in Zhejiang Province

种群 Population	土壤元素含量/mg · kg <sup>-1</sup> Soil element content											土壤 pH 值 Soil pH value
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Na		
富阳龙王坎 Longwangkan of Fuyang	213	3.3	94.7	3 504	1 214	168	4.2	2.7	718	14.9	7.79	
富阳碧东山 Bidongshan of Fuyang	369	11.7	99.4	4 995	566	253	6.2	3.9	549	15.5	7.56	
富阳五尖山 Wujianshan of Fuyang	92	3.6	53.7	5 452	505	59	4.3	1.8	318	12.4	8.00	
临安方山 Fangshan of Lin'an	294	6.1	109.6	2 444	681	95	23.7	1.8	395	18.8	8.06	

含量在 4 个种群间有明显差异,其中,土壤 Zn 含量以临安方山种群最高,富阳龙王坎种群最低,前者是后者的 5.70 倍;土壤 Fe 含量以富阳碧东山种群最高,富阳五尖山种群最低,前者是后者的 4.28 倍。另外,4 个种群的土壤均呈弱碱性,土壤 pH 值为 pH 7.56~pH 8.06。

2.3.2 灰色关联度分析 对 4 个种群种实 11 个表型性状与土壤相关因子进行灰色关联度分析,结果见

表 6。结果显示:各表型性状与同一土壤因子的关联度系数差异较小,即不同表型性状与单一土壤因子无明显相关性。不同土壤因子与同一表型性状的关联度系数有明显差异,即同一个表型性状需要多个土壤因子的综合作用。与表型性状的关联度系数均值从大到小依次为 pH 值、Na 含量、K 含量、Cu 含量、Mn 含量、Ca 含量、Mg 含量、N 含量、Fe 含量、P 含量、Zn 含量,表明蜡梅种实的表型性状变异与土壤 pH 值的

表 6 浙江省蜡梅野生种群种实表型性状与土壤相关因子的灰色关联度分析结果

Table 6 Result of grey correlation degree analysis on phenotypic traits of seed and fruit and soil related factors of wild populations of *Chimonanthus praecox* (Linn.) Link in Zhejiang Province

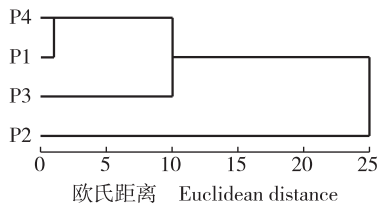
土壤因子 Soil factor	与不同表型性状的关联度系数 <sup>1)</sup> Correlation degree coefficient with different phenotypic traits <sup>1)</sup>											均值 Average
	SL	SW	CSF	GWS	FL	FW	CFF	FGD	WF	PWF	SNF	
N 含量 N content	0.697	0.707	0.680	0.708	0.694	0.692	0.698	0.717	0.714	0.660	0.737	0.700
P 含量 P content	0.679	0.683	0.667	0.680	0.673	0.671	0.685	0.693	0.669	0.644	0.687	0.676
K 含量 K content	0.819	0.809	0.812	0.824	0.840	0.822	0.825	0.820	0.789	0.791	0.794	0.813
Ca 含量 Ca content	0.763	0.754	0.744	0.742	0.766	0.767	0.739	0.762	0.850	0.754	0.847	0.772
Mg 含量 Mg content	0.748	0.719	0.751	0.720	0.757	0.755	0.730	0.720	0.702	0.761	0.709	0.734
Fe 含量 Fe content	0.665	0.639	0.663	0.643	0.689	0.675	0.653	0.644	0.726	0.706	0.764	0.679
Zn 含量 Zn content	0.544	0.538	0.542	0.537	0.538	0.541	0.536	0.540	0.534	0.541	0.543	0.539
Cu 含量 Cu content	0.766	0.738	0.764	0.747	0.796	0.777	0.758	0.746	0.834	0.781	0.880	0.781
Mn 含量 Mn content	0.771	0.750	0.759	0.757	0.806	0.784	0.764	0.764	0.806	0.798	0.805	0.779
Na 含量 Na content	0.875	0.885	0.859	0.886	0.849	0.861	0.874	0.883	0.811	0.831	0.815	0.857
pH 值 pH value	0.963	0.959	0.960	0.951	0.908	0.944	0.937	0.940	0.882	0.920	0.866	0.930

<sup>1)</sup> SL: 种子长 Seed length; SW: 种子宽 Seed width; CSF: 种形系数 Coefficient of seed form; GWS: 种子千粒质量 1 000-grain weight of seed; FL: 果实长 Fruit length; FW: 果实宽 Fruit width; CFF: 果形系数 Coefficient of fruit form; FGD: 果口直径 Fruit gap diameter; WF: 单果质量 Weight per fruit; PWF: 单果果壳质量 Pericarp weight per fruit; SNF: 单果种子数 Seed number per fruit.

关联性最大,与 Zn 含量的关联性最小。

#### 2.4 基于种实表型性状的供试种群的聚类分析

基于种实 11 个表型性状,采用 UPGMA 法对 4 个蜡梅野生种群进行聚类分析。结果(图 1)显示:在欧氏距离为 1 处,4 个种群分为 3 组。其中,临安方山和富阳龙王坎 2 个种群归为一组,距离最小且表型性状特征相似;富阳五尖山和富阳碧东山种群分别单独归为一组。将欧氏距离与地理距离进行相关性分析发现,二者间不存在显著相关性,说明供试的 4 个蜡梅野生种群种实表型性状变异没有随地理距离呈连续变化的趋势。



P1: 富阳龙王坎 Longwangkan of Fuyang; P2: 富阳碧东山 Bidongshan of Fuyang; P3: 富阳五尖山 Wujianshan of Fuyang; P4: 临安方山 Fangshan of Lin'an.

图 1 基于种实表型性状的浙江省 4 个蜡梅野生种群的聚类图  
Fig. 1 Cluster diagram of four wild populations of *Chimonanthus praecox* (Linn.) Link in Zhejiang Province based on phenotypic traits of seed and fruit

### 3 讨论和结论

表型性状既有变异性又有稳定性,是植物基因型和所处生境的综合体现。植物种群保持较高变异性有利于种群发展,变异系数越大,物种适应的环境条件越广。本研究结果表明:供试 4 个蜡梅野生种群的种子长、种子宽、种子千粒质量、果实长和果实宽的均值分别为 15.48 mm、6.94 mm、325.24 g、49.82 mm 和 15.76 mm,大于其他蜡梅野生种群相应表型性状的最大均值(13.4 mm、5.88 mm、229.8 g、35.7 mm 和 15.7 mm)<sup>[21-22]</sup>;另外,不同表型性状的变异系数差异较大(6.97%~45.72%),均值为 19.98%,高于夏蜡梅种群表型性状的变异系数均值(12.15%)<sup>[23]</sup>,表明浙江省蜡梅野生种群种实表型性状间存在比较丰富的遗传变异,因而,供试的浙江省 4 个蜡梅野生种群可作为优良的种质资源。由本研究结果还可见:蜡梅果实表型性状的变异系数明显大于种子表型性状,由此可知蜡梅的果实长、果实宽和果实质量等果

实表型性状主导蜡梅种实表型性状的变异方向。这一现象可能与种子位于果实内部,受外界环境选择的压力小,种子表型性状较为稳定有关,在思茅松<sup>[8]</sup>和夏蜡梅<sup>[23]</sup>等种类中也存在类似的现象。供试 4 个蜡梅野生种群间表型分化系数均值为 14.83%,低于张彩霞等<sup>[21]</sup>对蜡梅群体 8 个表型性状研究获得的表型分化系数(63.16%),这与研究中选取的表型性状不同有关。作者在实地调查中发现,受开花物候和海拔等生境因子的影响,野生的蜡梅个体传粉昆虫较少,种群可能存在较高的自交率,这也是其表型分化系数较低、种群内遗传变异占主导地位的原因之一。

Khurana 等<sup>[7]</sup>认为,与生活在空旷、易受干扰生境的物种相比,生活在郁闭度高、稳定生境中的物种的种子更大。在供试的 4 个蜡梅野生种群中,富阳龙王坎和富阳碧东山 2 个种群种实的多数表型性状显著或极显著高于另 2 个种群,说明这 2 个种群种实表型性状更佳,这可能与不同种群的生境差异有关。富阳龙王坎和富阳碧东山 2 个种群的生境相似,海拔均约 100 m,多沿陡峭的溪谷呈狭带状分布,且主要分布在沟谷中下部、溪边及山脊两侧,受人为影响较少;而富阳五尖山种群所处的群落无乔木层,其他灌木和草本植物也较少,群落内光照充足且相对空旷;临安方山种群所处的群落类型为落叶阔叶林,海拔较高、环境潮湿,且受周围村落的人为干扰较大。邓洪平等<sup>[24]</sup>认为,生长在土层厚、土壤肥沃等土壤条件较好的植物,其种子的长度、宽度、厚度、总质量等形态指标均明显大于生长于不良土壤条件的植物,且土壤类型对种子形态也有一定的影响。富阳碧东山土层厚且松软肥沃,而富阳五尖山和临安方山的土层薄、土壤贫瘠且石灰岩较多,因而,蜡梅野生种群种实表型性状差异可能是对不同生境适应的表现。

灰色关联度分析结果表明:土壤 pH 值与蜡梅野生种群种实表型性状的关联度系数较高。土壤 pH 值是土壤化学性质的综合反映,土壤中 N、P 和 K 元素的转化和释放,Ca、Fe 和 Mg 等微量元素的有效性,有机质的合成和分解及微生物的活动等<sup>[25]</sup>都与土壤 pH 值相关,因而,与单一土壤因子的影响效应相比,其综合性更强,这可能是导致其关联度系数较高的原因。N、P、K 和 Ca 等元素是植物体内重要物质(如核酸、蛋白质和叶绿素等)的组成成分,能直接或间接影响植物的生长发育和代谢;单一土壤因子不能单独对植物的某些表型性状起主要作用,植物表型性状的

形成需要多个土壤因子甚至所有环境因子的综合作用。依据种实表型性状对供试蜡梅野生种群进行聚类分析,其结果与种群间的地理距离无关,说明在相对较小的分布范围内,遗传是蜡梅野生种群种实表型性状变异的主导因子。

综上所述,供试蜡梅野生种群种实表型性状具有丰富的变异,这与环境因子密切相关,但本研究只对部分土壤因子与种实表型性状进行了灰色关联度分析,而植物种实表型性状变异还可能与植物体大小、物候期、系统发育、基因控制和控制程度等因子有关,这些有待深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 李伟,林富荣,郑勇奇,等. 皂荚南方天然种群种实表型多样性[J]. 植物生态学报, 2013, 37(1): 61-69.
- [2] 孙玉玲,李庆梅,杨敬元,等. 秦岭冷杉球果与种子的形态变异[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 176-181.
- [3] GARCIA R, SIEPIELSKI A M, BENKMAN C W. Cone and seed trait variation in whitebark pine (*Pinus albicaulis*; Pinaceae) and the potential for phenotypic selection [J]. American Journal of Botany, 2009, 96(5): 1050-1054.
- [4] 柯文山,钟章成,席红安,等. 四川大头茶地理种群种子大小变异对萌发、幼苗特征的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 697-701.
- [5] ERIKSSON O. Seed size variation and its effects on germination and seedling performance in the clonal herb *Convallaria majalis* [J]. Acta Oecologica, 1999, 20(1): 61-66.
- [6] KHURANA E, SINGH J S. Influence of seed size on seedling growth of *Albizia procera* under different soil water levels [J]. Annals of Botany, 2000, 86(6): 1185-1192.
- [7] KHURANA E, SAGAR R, SINGH J S. Seed size: a key trait determining species distribution and diversity of dry tropical forest in northern India [J]. Acta Oecologica, 2006, 29(2): 196-204.
- [8] 李帅锋,苏建荣,刘万德,等. 思茅松天然群体种实表型变异[J]. 植物生态学报, 2013, 37(11): 998-1009.
- [9] 张文标,金则新. 夏蜡梅果实和种子形态变异及其与环境因子相关性[J]. 浙江大学学报(理学版), 2007, 34(6): 689-695.
- [10] 蔡琰琳,金则新. 濒危植物夏蜡梅果实、种子形态变异研究[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(3): 44-49.
- [11] 邵文豪,刁松峰,董汝湘,等. 无患子种实形态及经济性状的地理变异[J]. 林业科学研究, 2013, 26(5): 603-608.
- [12] 李全健,王彩霞,田敏,等. 浙江扇脉杓兰野生居群的表型性状变异及其与地理-土壤养分因子的相关性[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(2): 45-52.
- [13] 赵冰,张启翔. 蜡梅种质资源表型多样性[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(5): 10-13, 35.
- [14] 明军,明刘斌. 蜡梅科植物种质资源研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(增刊): 128-135.
- [15] 明军,廖卉荣. 蜡梅科植物种质资源研究文献分析[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2004, 3(3): 60-66.
- [16] 李根有,金水虎,楼炉煊,等. 浙江省野生蜡梅数量及群落学研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(6): 30-33.
- [17] 李根有,楼炉煊,金水虎,等. 浙江省野生蜡梅群落及其区系[J]. 浙江林学院学报, 2002, 19(2): 127-132.
- [18] 葛颂,王明麻,陈岳武. 用同工酶研究马尾松群体的遗传结构[J]. 林业科学, 1988, 24(4): 399-409.
- [19] 刘玉成,杜道林,岳泉. 缙云山森林次生演替中优势种群的特性与生态因子的关联度分析[J]. 植物生态学报, 1994, 18(3): 283-289.
- [20] 肖宜安,何平,邓洪平. 井冈山长柄双花木种群形态分化的数量分析[J]. 武汉植物学研究, 2002, 20(5): 365-370.
- [21] 张彩霞,左丹丹,赵海涛,等. 蜡梅天然群体表型多样性分析[J]. 西南林业大学学报, 2011, 31(5): 19-23.
- [22] 赵冰,张启翔. 蜡梅种质资源表型多样性[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(5): 10-13, 35.
- [23] 陈香波,叶文国,田旗,等. 夏蜡梅天然群体表型变异及分布特征[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 133-140.
- [24] 邓洪平,何平,钟章成. 不同地理种源及演替群落的四川大头茶居群种子形态分化研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1999, 24(2): 207-213.
- [25] 孙凡,钟章成. 四川大头茶繁殖分配及其环境适应性的关联度研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(1): 44-52.

(责任编辑:郭严冬)